ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

Научная статья
УДК 620.172.24
DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-37-46

ИЗГОТОВЛЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ 3D-ПЕЧАТИ

Коротков Виталий Александрович,
Мельников Владислав Викторович

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* для корреспонденции: korotkov-va@mail.ru

Аннотация.
Проведены исследования по оценке эффективности применения различных материалов, а также схем и режимов 3D-печати для изготовления упрочняющих элементов шлифовальных инструментов на полимерных связующих. Изготавливались и испытывались на растяжение образцы из материалов шести разновидностей: из PLA; PETG; ABS; PETG-наполненного углеродным волокном; угленаполненного полиамида 6 (нейлона) и из фотополимерной ударопрочной смолы. Изготовление производилось методами экструзионной FDM- печати и стереолитографической LCD-печати. Также применялись три схемы печати – с поперечным расположением слоев, с наклонным расположением слоев и с продольным расположением слоев относительно продольной оси образцов. Применялись стандартные режимы печати, а также с увеличенным перекрытием между слоями, уменьшенным сечением и увеличенным количеством слоев. Установлено, что при всех схемах печати наибольшим пределом прочности на растяжение обладает угленаполненный полиамид 6, армированный волокнами карбона. Предел прочности на растяжение образцов из этого материала, изготовленных по продольной схеме экструзионной 3D-печати, составляет $\sigma_в$=146,5÷154,4 МПа, он в несколько раз выше, чем у других испытанных материалов и сопоставим с показателями мягких металлов и сплавов, что позволяет использовать этот материал для изготовления опытных конструкций упрочняющих сеток шлифовальных кругов. Наилучшей схемой 3D-печати упрочняющих элементов является продольное формирование слоев изделия относительно направления действия растягивающих нагрузок. Увеличение перекрытия между слоями при 3D-печати на 20% и уменьшение толщины слоев и увеличение их количества в два раза позволяет дополнительно повысить прочность изделий соответственно на 17% и на 5%. Угленаполненный полиамид 6 успешно применяется в дальнейших исследованиях по нахождению оптимальной формы ячеек упрочняющих сеток для армирования шлифовальных кругов на полимерных связующих.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
31 марта 2025 г.

Одобрена после рецензирования:
22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:
30 апреля 2025 г.

Опубликована:
11 июня 2025 г.

Ключевые слова:
шлифовальные круги, упрочняющие сетки, экструзионная и фотополимерная 3D-печать, схемы и режимы 3D-печати, предел прочности на растяжение
.

Для цитирования: Коротков В.А., Мельников В.В. Изготовление упрочняющих элементов шлифовальных инструментов на основе 3D-печати // Вестник Кузбасского государственного

технического университета. 2025. № 2 (168). С. 37-46. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-37-46, EDN: ADFYWA

Введение

При изготовлении твердотельных шлифовальных инструментов, таких как шлифовальные круги на полимерных связующих, широко применяются упрочняющие элементы – сетки на основе стекловолокна, втулки и кольца. Сетки укладывают при изготовлении кругов в прессформу послойно с формовочной абразивной смесью, а металлические или полимерные втулки и кольца устанавливают у посадочного отверстия кругов. Наличие таких элементов позволяет существенно повысить прочность, рабочую скорость, производительность и качество шлифования [1]. Так, армирование шлифовальных кругов на бакелитовой связке стеклосетками типа СПАП (сетки перевивочного плетения, армирующие, пропитанные связующим ТУ6-48-00205009-131–99, ТУ6-48-122–94) позволяет существенно повысить рабочие скорости кругов с 50÷60 м/с до 80÷100 м/с и более [2, 3, 4, 5]. При этом следует отметить, что основное влияние на возможное разрушение круга при работе оказывают тангенциальные растягивающие напряжения, возникающие от действия центробежной силы, величины которых имеют максимальные значения у посадочного отверстия кругов [6, 7, 8, 9]. Эти напряжения пропорциональны квадрату скорости круга, поэтому для повышения максимальной рабочей скорости инструмента, например, в 2 раза необходимо повысить предел прочности на растяжение абразивного композита в 4 раза.

Актуальным направлением повышения прочности шлифовальных кругов на полимерных связующих являются подбор оптимальной формы и расположения нитей армирующих сеток. Прочность самих сеток можно повысить за счет подбора более прочных материалов.

Широкие возможности для исследований в этих направлениях открывают методы 3D-печати, которые в настоящее время активно развиваются и находят все более широкое применение в различных областях промышленного производства. Методами 3D-печати можно получать изделия из различных полимерных материалов, в том числе таких как ABS, PETG, PLA, TPU, фотополимерной смолы и композитных полимерных материалов. Если в эти материалы добавлять карбоновые волокна или нити, то можно ожидать значительного эффекта по повышению прочности, т. к. некоторые из них имеют пределы прочности на растяжение, сопоставимые с показателями у цветных металлов [10].

Существуют две основные разновидности 3D-печати полимерными материалами – стереолитографическая и экструзионная (струйная). В представленном исследовании по нахождению новых материалов, схем и режимов для изготовления упрочняющих элементов шлифовальных кругов применялись экструзионная FDM-печать и стереолитографическая LCD-печать. FDM – это технология 3D-печати, которая используется для создания объектов из термопластических материалов. В процессе изготовления изделия материал подается печатающей головкой в виде нити (филамента), которая плавно и постепенно наносится послойно на платформу. LCD – это технология 3D-печати, основанная на использовании жидких фотополимерных смол и ультрафиолетового света для создания объектов. В процессе печати ультрафиолетовый свет через жидкокристаллический экран проецирует изображение на слой смолы, производя отверждение только в тех местах, куда он был направлен.

Методика исследований

В данной работе для FDM-печати был использован принтер модели «Flying Bear Reborn 2», а для LCD-печати был использован принтер модели «Anycubic Photon Mono 2» (Рис. 1). Целью исследования ставилось выявить наилучший полимерный материал с точки зрения предела прочности на растяжение, а также вида и схемы 3D-печати, обеспечивающих наибольшую прочность.

В процессе проведения исследований выяснилось, что на результаты работы весьма существенно влияют вид, схема и режимы 3D-печати, что потребовало проведения дополнительных экспериментов в этом направлении.

Для проведения исследований различными методами 3D-печати, из различных материалов, при различных схемах и режимам изготавливались образцы (Рис. 2, а, б), которые затем испытывались на растяжение на стенде модели «МСМ» (Рис. 3). Цикл испытания образцов заключался в следующем. На установке для проведения испытаний на растяжение-сжатие модели «МСМ» устанавливалась оснастка для испытания на растяжение – переходные втулки в верхней части рамы установки, куда посредством резьбовых соединений крепился испытуемый образец. Усилие растяжения обеспечивалось путем нагнетания давления масла в гидроцилиндр посредством возвратно-поступательных ручных перемещений рычага гидронасоса. Усилие разрушения образцов фиксировалось по видеозаписи показаний манометра с пределом измерения 400 кгс/см^2, встроенного в

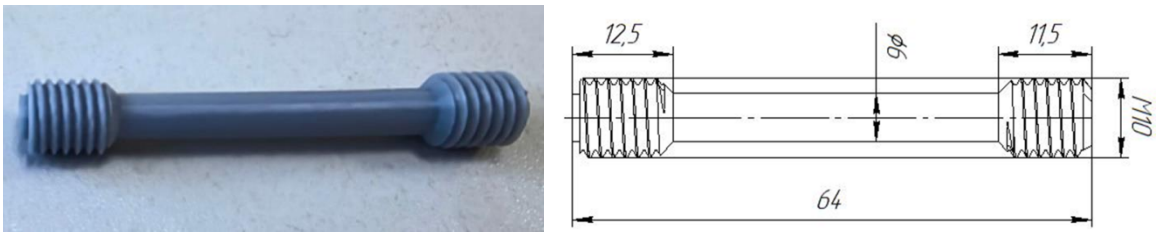
гидросистему домкрата. Помимо давления установка позволяла фиксировать относительное удлинение образцов с помощью штатно установленного электронного штанген-глубиномера. Усилие разрушения образцов рассчитывалось путем умножения давления разрушения на площадь поперечного сечения поршня домкрата. На основе полученных данных и известной площади поперечного сечения шейки разрушаемых образцов рассчитывался предел прочности образцов на растяжение ($\sigma_в$, МПа).

Изготавливались образцы из материалов шести разновидностей: PLA; PETG; ABS; PETG-наполненный углеродным волокном; угленаполненный полиамид 6 (нейлон); фотополимерная ударопрочная смола. Такой выбор был вызван желанием оценить максимально возможный широкий спектр материалов с различной теплостойкостью и физико-механическими свойствами (Рис. 1). Использованные материалы по сведениям от их производителей обладают следующими характеристиками:

- PLA представляет собой биополимер, изготовленный из растительного сырья, такого как кукурузный крахмал или сахарный тростник. PLA имеет низкую температуру плавления (около 180–220°C), высокую адгезию и точность печати;

а) *б)*

Рис. 1. 3D-принтеры, использованные для проведения исследований: экструзионный принтер модели «Flying Bear Reborn 2» (а) и стереолитографический принтер модели «Anycubic Photon Mono 2» (б)
Fig. 1. 3D printers used for the research: Flying Bear Reborn 2 extrusion printer (a) and Anycubic Photon Mono 2 stereolithography printer (b)



а) *б)*

Рис. 2. Внешний вид (а) и чертеж (б) образцов, изготовленных методами 3D-печати для проведения испытаний на растяжение
Fig. 2. External appearance (a) and drawing (b) of samples manufactured using 3D printing methods for tensile testing

Рис. 3. Установка модели «МСМ», использованная для проведения испытаний образцов на растяжение
Fig. 3. The «MCM» model machine used to conduct tensile testing of samples

- PETG – это сокращенное наименование полиэтилентерефталат-гликоль-модифицированный, который обладает высокой механической прочностью и хорошей устойчивостью к ударам, изгибающим нагрузкам и химическим веществам (кислотам, щелочам и маслам). Термостойкость материала составляет 80–90 °C;

- ABS – это сокращение наименование акрилонитрил-бутадиен-стирола, который обладает высокой прочностью на разрыв и ударной прочностью, термостойкостью до 90–100°C, хорошей устойчивостью к таким материалам, как масло, бензин, жиры и многие растворители;

- PETG-наполненный углеродным волокном – это композитный материал, который обладает улучшенными механическими свойствами за счет добавления в исходный материал частиц углеволокна;

- Угленаполненный полиамид 6 (нейлон) – это пластик, в состав которого входят углеродные волокна, что значительно улучшает его механические характеристики. Материал обладает очень высокими противоизносными свойствами, термостойкостью 150–180 °C, обеспечивает хорошую стойкость к различным химическим веществам (маслам, топливу, растворителям).

Фотополимерная ударопрочная смола обладает высокой устойчивостью к механическим повреждениям и нагрузкам.

Результаты и обсуждение

Проведенные в дальнейшем испытания показали, что прочность на растяжение у указанных материалов может варьироваться в широком интервале. Наибольший интерес представляют материалы, армированные карбоновыми волокнами. Существуют полимерные материалы для экструзионной FDM 3D-печати, армированные как волокнами карбона, так и непрерывной карбоновой нитью, внедренной в филамент [10]. Для 3D-печати последним из упомянутых материалов необходимо наличие дорогостоящих промышленных принтеров специальной конструкции. Карбон – это относительно новый материал, применяемый в композитных изделиях для повышения их прочности. Предшественником карбона по применению в таких изделиях часто является стекловолокно, но, как показывает множество исследований и аналитических данных, применение карбона дает больший эффект повышения прочности по

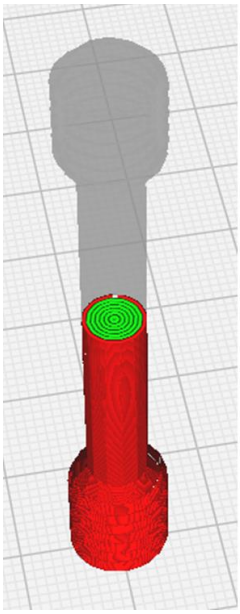


Рис. 4. Схема 3D-печати №1 вертикальная, путем создания слоев перпендикулярно оси изделия
Fig. 4. 3D-printing scheme No. 1 vertical, by creating layers perpendicular to the axis of the product

сравнению с применением стекловолокна, например, при изготовлении деталей планера и обшивки самолетов [11].

В нашем случае от наполненных углеродным волокном материалов при планировании экспериментов ожидались наибольшие показатели прочности. Кроме того, эти материалы обладают наибольшей термостойкостью и печатаются при температурах 260–300 °С. В процессе проведения испытаний выяснилось, что на прочность образцов также существенно влияет схема их печати. На первом этапе исследования образцы изготавливались по наиболее простой схеме, путем вертикального наслаивания материалов, слоями перпендикулярно оси изделия (Рис. 4).

При проведении исследований изготавливалось и разрушалось по три и более испытательных образца из каждой марки материала. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по схеме №1, представлены в Таблице 1.

Наилучшие результаты среди всех материалов показал угленаполненный полиамид 6. Его предел прочности на растяжение при данной схеме печати на 23% выше, чем у PETG, на 27% выше ABS, на 38% выше PETG-наполненного углеродным волокном, а также фотополимерной смолы, и на 79% выше PLA.

Вместе с тем на всех разрушенных образцах отчетливо фиксировалось, что разрушение происходило по адгезионной зоне между слоями. Исходя из этого, для повышения прочности изделия нужно располагать слои печати вдоль действующих растягивающих нагрузок. Для этого схема печати изменена с вертикальной на горизонтальную (Рис. 5). При этом варианте печати наружная оболочка изготавливалась продольными проходами на величину одного прохода печатающей головки. Внутреннее заполнение производилось проходами под углом 45 градусов к продольной оси изделия.

Последующие прочностные испытания полностью подтвердили, что даже частичное расположение нитей в продольном, а также в наклонном направлениях дает существенное повышение прочности. Как и в предыдущем случае, наилучшие результаты показали образцы

Таблица 1. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по схеме №1 с вертикальным образованием слоев
Table 1. Results of tensile tests of samples manufactured according to scheme No. 1 with vertical formation of layers

№	Вид пластика	Температура печати, °С	Относительное удлинение, мм	$\sigma_в$, МПа
1	PLA	190	3	26,8
2	PETG (производитель №1)	250	2,8	38,9
3	PETG (производитель №2)	230	2,6	31,5
4	ABS	260	2,9	37,8
5	Угленаполненный полиамид 6	280	2,7	48
6	PETG-наполненный углеродным волокном	290	2,4	34,7
7	Фотополимерная смола		4,3	34,7

из угленаполненного полиамида 6 (Таблица 2), при этом прочность образцов из этого материала при данной схеме печати в среднем в 2,5 раза выше, чем при схеме вертикальной печати с поперечным расположением слоев. Кроме того, изготовление и испытание образцов из угленаполненного полиамида 6 с усиленным перекрытием между слоями (заполнение 120%) показало, что данное техническое решение позволяет дополнительно увеличить предел прочности образцов на растяжение на 17% (Таблица 2, п. 7). Однако при этом ощутимо ухудшаются геометрическая точность и внешний вид изделий, появляются заусенцы и наплывы.

Для дальнейшего повышения прочности образцов принято решение изготавливать их

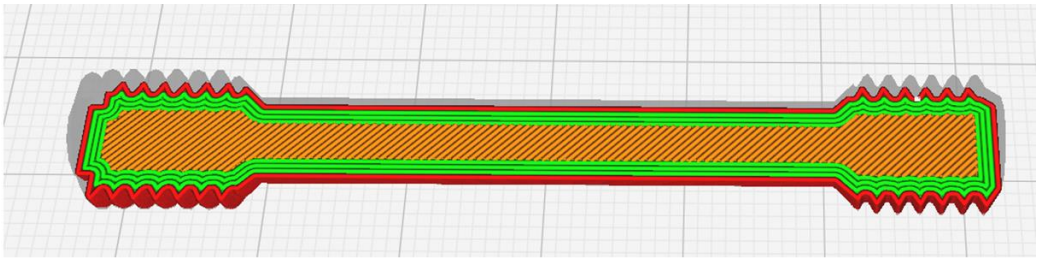


Рис. 5. Схема 3D-печати №2 горизонтальная, с внутренним заполнением слоев под углом 45° к оси изделия
Fig. 5. 3D-printing scheme No. 2 horizontal, with internal filling of layers at an angle of 45° to the product axis

Таблица 2. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по схеме №2, с горизонтальным продольным наслаиванием и внутренним заполнением слоев под углом 45° к оси изделия
Table 2. Results of tensile tests of samples manufactured according to scheme No. 2, with horizontal longitudinal layering and internal filling of layers at an angle of 45° to the axis of the product

№	Вид пластика	Температура печати, °С	Относительное удлинение, мм	$\sigma_в$, МПа
1	PLA	190	3,4	64,1
2	PETG (производитель №1)	230	3,2	46,2
3	PETG (производитель №2)	230	3	47,3
4	ABS	260	3,6	50,4
5	Угленаполненный полиамид 6	300	4,6	120,8
6	PETG-наполненный углеродным волокном	260	2,2	56,7
7	Угленаполненный полиамид 6 с заполнением 120%	260	4	141,8

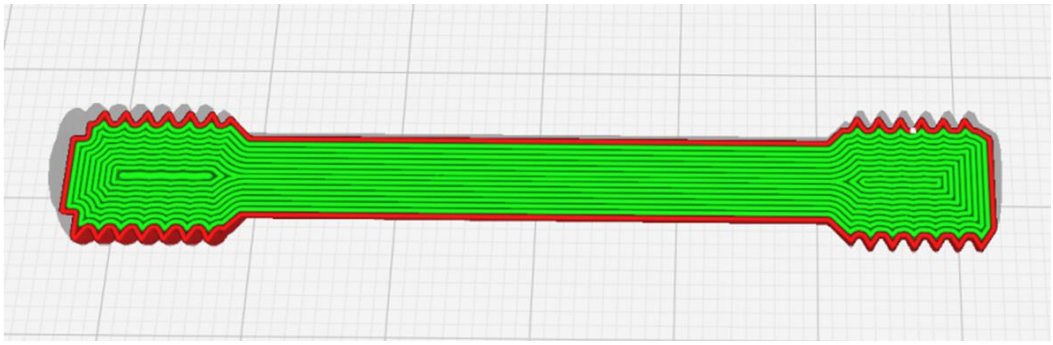


Рис. 6. Схема 3D-печати №3 горизонтальная продольная
Fig. 6. 3D-printing scheme No. 3 horizontal longitudinal

Таблица 3. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по схеме №3, с горизонтальным продольным наслаиванием
Table 3. Results of tensile tests of samples manufactured according to scheme No. 3, with horizontal longitudinal layering

№	Вид пластика	Температура печати, °С	Относительное удлинение, мм	$\sigma_в$, МПа
1	PLA	190	2,9	75,6
2	PETG	230	39	63
3	ABS	260	2,5	61,4
4	Угленаполненный полиамид 6	300	2	146,5
5	PETG-наполненный углеродным волокном	260	2,7	63
6	Фотополимерная смола	-	3,4	52
7	Угленаполненный полиамид 6 с толщиной линии 0,2 мм	300	2,5	154,4

исключительно продольными проходами вдоль продольной оси симметрии изделия (Рис. 6). При написании управляющей программы (G-кода) для изготовления изделия по данной схеме, в CAM-программе (слайсере) был выбран и настроен соответствующий шаблон заполнения. Предел прочности у образцов, изготовленных по данной схеме, оказался больше, чем в предыдущей схеме печати, на 20÷30% (Таблица 3).

Таким образом, при изготовлении изделий, испытывающих преимущественно растягивающие нагрузки, необходимо использовать схему печати слоев изделия вдоль направления действия этих нагрузок. Если изделие испытывает разнонаправленные растягивающие нагрузки, то лучше применить схему №2, с продольным заполнением наружного слоя и диагональным заполнением внутреннего пространства изделия. Для нахождения режимов печати, обеспечивающих более высокую прочность, были также проведены дополнительные испытания. При изготовлении образцов из угленаполненного полиамида 6 по схеме печати №2 был увеличен параметр заполнения.

Это позволило соседним слоям лучше перекрывать друг друга и соединяться, что в свою очередь увеличило предел прочности на растяжение на 17% (Таблица 2, пп. 5, 7). При схеме печати №3 образцов из угленаполненного полиамида 6 была уменьшена ширина линий печати в два раза, что позволило увеличить количество нитей и несколько увеличить предел прочности на растяжения образцов на 5% (Таблица 3, пп. 5, 7).

Выводы

Комплексный анализ результатов испытаний показывает, что при всех схемах печати наибольшим пределом прочности на растяжение обладает угленаполненный полиамид 6, армированный волокнами карбона.

Предел прочности на растяжение образцов из этого материала, изготовленных по продольной схеме экструзионной 3D-печати, составляет $\sigma_в$=146,5÷154,4 МПа и сопоставим с этим показателем у мягких металлов и сплавов, что позволяет использовать этот материал для изготовления опытных конструкций упрочняющих элементов шлифовальных кругов. Наилучшей схемой 3D-печати упрочняющих элементов является продольное формирование слоев изделия относительно направления действия растягивающих нагрузок. Увеличение перекрытия между слоями при 3D-печати, уменьшение толщины слоев и увеличение их количества позволяет дополнительно повысить прочность изделий. Угленаполненный полиамид 6 успешно используется в дальнейших исследованиях по нахождению оптимальной формы ячеек упрочняющих сеток для армирования шлифовальных кругов на полимерных связующих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротков В. А., Мельников В. В. Изготовление и результаты испытаний экспериментальных кругов с применением в качестве связки эпоксидной смолы // Научно-технический прогресс: Актуальные и перспективные направления будущего: Сборник VI международной научно-практической

конференции, 18.08.2017. Кемерово : ЗапСибНЦ, 2017. Т 2. С. 117–120.

2. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. Ленинград : Машиностроение, 1979. 248 с.

3. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / под ред. А. М. Ковальчука. Москва : Машиностроение, 1984. 288 с.

4. Абразивные материалы и инструменты. Каталог / под. ред. В. Н. Тыркова. Москва : ВНИИТЭМР, 1986. 358 с.

5. Коротков А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов : монография / ГУ КузГТУ. Кемерово, 2005. – 232 с.

6. Коротков В. А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов : монография. М. : Машиностроение, 2009. 178 с.

7. Нетребко В. П., Коротков А. Н. Прочность шлифовальных кругов. М. : Агентство Российской печати, 1992. 104 с.

8. Jackson M. J. A review of the design of grinding wheels operating at excessive speeds // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. № 94. С. 3979–4010. [link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1131-2].

9. Fritz Klocke, Sebastian Barth, Patrick Mattfield. High Performance Grinding. Aachen University. ScienceDirect. Procedia CIRP. 2016. Vol. 46. Pp. 266–271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.067.

10. Кондрашов С. В. [и др.] Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (81). С. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.

11. Сидорина А. И. [и др.] Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). С. 47–58. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:
Коротков Виталий Александрович, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: korotkov-va@mail.ru
Мельников Владислав Викторович, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: mvvru@mail.ru

Заявленный вклад авторов:
Коротков Виталий Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста.
Мельников Владислав Викторович – сбор и анализ данных, написание текста, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

MANUFACTURING OF REINFORCING ELEMENTS OF GRINDING TOOLS BASED ON 3D PRINTING

Korotkov Vitaly A., Melnikov Vladislav V.

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: korotkov-va@mail.ru

Article info
Received:

Abstract.
Studies have been conducted to evaluate the effectiveness of using various materials, as well as schemes and modes of 3D printing for the manufacture of hardening elements of grinding tools based on polymer binders. Samples were made and tested for tensile strength from six types of materials: PLA;

31 March 2024

Accepted for publication:
22 April 2025

Accepted:
30 April 2025

Published:
11 June 2025

Keywords: *шлифовальные круги, упрочняющие сетки, экструзионная и фотополимерная 3D-печать, схемы и режимы 3D-печати, предел прочности на растяжение*
.

PETG; ABS; PETG-filled with carbon fiber; carbon-filled polyamide 6 (nylon) and photopolymer impact-resistant resin. The production was carried out using extrusion FDM printing and stereolithographic LCD printing. Three printing schemes were also used – with a transverse arrangement of layers, with an inclined arrangement of layers and with a longitudinal arrangement of layers relative to the longitudinal axis of the samples. Standard printing modes were used, as well as with increased overlap between layers, reduced cross-section and increased number of layers. It has been established that carbon-filled polyamide 6, reinforced with carbon fibers, has the highest tensile strength in all printing schemes. The tensile strength of samples made of this material, manufactured according to the longitudinal scheme of 3D extrusion printing, is σb =146.5-154.4 MPa, it is several times higher than that of other tested materials and is comparable to those of soft metals and alloys, which makes it possible to use this material for the manufacture of experimental reinforcing structures. grids of grinding wheels. The best 3D printing scheme for reinforcing elements is the longitudinal formation of product layers relative to the direction of action of tensile loads. Increasing the overlap between the layers during 3D printing by 20% and reducing the thickness of the layers and doubling their number makes it possible to further increase the strength of the products by 17% and 5%, respectively. Carbon-filled polyamide 6 is successfully used in further research to find the optimal shape of reinforcing mesh cells for reinforcing grinding wheels on polymer binders.

For citation: Korotkov V.A., Melnikov V.V. Manufacturing of reinforcing elements of grinding tools based on 3D printing. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 2(168):37-46. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-37-46, EDN: ADFYWA

REFERENCES

1. Korotkov V.A., Melnikov V.V., Manufacture and test results of experimental grinding wheels using epoxy as a binder. *Scientific technical progress : Actual and perspective directions of future : Digest of VI international scientific practical conference.* 18.08.2017. Kemerovo: West Siberian scientific center; 2017. Vol. 2. Pp. 117–120.
2. Filimonov L.N. High-speed polishing, Mechanical Engineering. Leningrad. 1979.
3. Kovalchuk A.M. Fundamentals of design and manufacturing technology of abrasive and diamond tools. Moscow: Mechanical Engineering; 1984.
4. Tyrkov V.N. Abrasive materials and instruments. Catalogue, All-Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies in Mechanical Engineering and Robotics. Moscow. 1986.
5. Korotkov A.N. Increase of operational opportunities of grinding tools. Kemerovo: Publishing House of Kuzbass State Technical University; 2005.
6. Korotkov V.A. Increase of operational opportunities of cutting discs. Moscow: Mechanical Engineering;2009.
7. Netrebko V.P., Korotkov A. N. Strength of grinding wheels, Russian Press Agency. Moscow, 1992.
8. Jackson M.J. A review of the design of grinding wheels operating at excessive speeds, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018; 94:3979–4010. [link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1131-2].
9. Fritz Klocke, Sebastian Barth, Patrick Mattfield. High Performance Grinding, Aachen University. ScienceDirect. Procedia CIRP. 2016; 46:266–271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.067.
10. Kondrashov S.V., Pykhtin A.A., Larionov S.A., Sorokin A.E. Influence of FDM printing process modes and composition of materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review). *Proceedings of VIAM.* 2019; 10(81):34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.
11. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aviation products. *Proceedings of VIAM.* 2020; 12 (94):47–58. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:
Vitaly A. Korotkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28, e-mail: korotkov-va@mail.ru
Vladislav V. Melnikov, postgraduate student, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russia, Vesennaya str., 28, e-mail: mvvru@mail.ru

Contribution of the authors:
Vitaly A. Korotkov – formulation of a research problem, scientific management, conceptualization of research, conclusions, writing a text.
Vladislav V. Melnikov– data collection and analysis, text writing, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.